

酸雨对全生育时期水稻叶绿素荧光的影响

王雯, 李曼, 王丽红, 周青*

江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要: 酸雨是全球关注的重大环境污染问题之一, 中国亦继西欧和北美之后, 成为当今世界第三大酸雨区。光合作用是植物生物量和作物经济产量形成的生理基础, 叶绿素荧光常用来判断逆境胁迫对植物光合作用造成的伤害。有研究表明, 酸雨会对植物叶绿素荧光造成影响, 然不同生长阶段植物对逆境的抵抗能力亦存在差异, 采用模拟酸雨(酸雨 pH 值梯度为 4.5、3.5、2.5)或模拟天然降水持续胁迫(每隔 3 天喷施 1 次)水稻(*Oryza sativa*)(从幼苗期至灌浆期), 利用原位无损叶绿素荧光测定技术(德国 Walz 公司 PAM-210 脉冲调制式荧光仪)分别探测和分析幼苗期、分蘖期、孕穗期和灌浆期水稻叶片(处理组和对照组), 研究酸雨对全生育期水稻叶绿素荧光的影响, 相关研究未见报道。结果表明, 与 CK 相比, pH 4.5 酸雨使幼苗期和孕穗期初始荧光(F_0)显著提高了 7.69%、8.84%, 使幼苗期、分蘖期和孕穗期非光化学猝灭参数(q_N)显著提高了 8.64%、4.86%、6.09%, 使幼苗期和孕穗期最大光化学量子产量(F_v/F_m), PSII 电子传递速率(ETR), 实际原初光能捕获效率(Φ_{PSII}), 光化学猝灭参数(q_P)显著降低, 幼苗期、孕穗期降幅依次为 F_v/F_m (3.01%、6.88%)、ETR(8.40%、10.24%)、 Φ_{PSII} (8.39%、12.23%)、 q_P (3.79%、12.55%); pH 3.5、pH 2.5 酸雨不同程度地显著降低了各生育时期 F_v/F_m 、ETR、 Φ_{PSII} 、 q_P , 幼苗期和孕穗期 q_N , 显著提高了各生育时期 F_0 , 且随酸雨 pH 值降低, 变化幅度增大。同时, pH 4.5 或 pH 3.5 酸雨持续胁迫下, 水稻受到伤害大小规律为灌浆期<幼苗期<分蘖期<孕穗期; pH 2.5 酸雨持续胁迫下, 水稻受到伤害大小规律为分蘖期<幼苗期<灌浆期<孕穗期。总之, 酸雨胁迫强度与水稻叶绿素荧光参数存在剂量-效应关系, 酸雨持续胁迫会对不同生育时期水稻光合作用造成影响, 并且不同生育时期水稻光合作用对酸雨胁迫敏感性存在差异, 这些是评价酸雨胁迫对植物影响时需考虑因素。

关键词: 酸雨; 水稻; 全生育期; 持续胁迫; 叶绿素荧光

中图分类号: X503.231

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906(2014)01-0080-06

引用格式: 王雯, 李曼, 王丽红, 周青. 酸雨对全生育时期水稻叶绿素荧光的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 80-85.

WANG Wen, LI Man, WANG Lihong, ZHOU Qing. Effects of acid rain on the chlorophyll fluorescence reaction in rice at the whole growth stages [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(1): 80-85.

酸雨(Acid rain, AR)是当代全球重大环境问题之一, 受到广泛关注(Menz 和 Seip, 2004)。继西欧和北美之后, 中国已成为当今世界第三大酸雨区(Larssen 等, 2006)。中国酸雨区主要分在长江以南和青藏高原以东(解淑艳等, 2012), 且近年来酸雨污染仍有加重趋势(环境保护部, 2010)。众多研究表明酸雨会直接或间接影响作物生长发育和产量(Hu 等, 2009; Koricheva 等, 1997; Wood 和 Bormann, 1974; Wyrwicka 和 Skłodowska, 2006; Yu 等, 2002; 童贯和, 2005)。光合作用是植物体内中心同化路径, 是植物生物量和作物经济产量形成的生理基础。研究酸雨对作物光合作用的影响理应更受关注。叶绿素荧光作为光合作用研究的探针, 可以用来评价光合作用主要的光合化学反应、PSII 效率和电子载体上电子传递效率(Kummerová 等, 2006), 推测光合作用中心 PSI 与 PSII 的结构是否受到破坏等。目前

国际上植物体内叶绿素荧光动力学的研究已成为热点, 并在逆境生理研究中得到广泛应用(Kooten 和 Snel, 1990; Massacci 等, 1995)。Vialita 等通过叶绿素荧光参数研究表明, pH 1.8 模拟酸雨造成菜豆(*Phaseolus vulgaris*)PSII 失活, 电子传递受阻, 光能利用率降低(Velikova 等, 1999)。Sun 等(Sun 等, 2012)通过叶绿素荧光参数研究发现镉和酸雨复合胁迫阻碍了大豆(*Glycine max*)幼苗叶片光能吸收, 电子传递, 光能转化等过程。

作物的生长不仅受到外界胁迫的影响, 还与作物自身生长发育时期密切相关。逆境生物学研究表明, 不同生长阶段植物对逆境的抵抗能力亦存在差异(Kooten 和 Snel, 1990)模拟酸雨分别处理拔节期(姚桃峰等, 2010)、孕穗期(王润年等, 2011)和灌浆期(姚桃峰等, 2010)小麦(*Triticum aestivum* Linn), 发现其对光合特性的影响不同, 表明酸雨胁迫不同

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170477); 江苏省教育厅研究生创新基金(CXLX12_0735)

作者简介: 王雯(1989 年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境生态学。E-mail: wangwensmil@163.com

*通信作者: 周青(1957 年生)。E-mail: zhouqeco@126.com

收稿日期: 2013-11-25

生育时期植物, 光合速率的变化不同。然而, 在酸雨区, 持续生长在酸雨环境中的作物各生育时期光合作用会发生怎样的变化尚不清楚。这往往会给准确评价污染物致害效果, 并由此建立该污染物的环境安全相关结论造成困难。水稻作为重要的粮食作物, 是国内外科学家作物研究的焦点(Liu 等, 2013; Nakamura 等, 2013; Niu 等, 2013; Yang 等, 2013)。鉴于此, 本文以水稻为试材, 采用叶绿素荧光技术, 研究持续酸雨胁迫对全生育时期水稻叶绿素荧光的影响, 为科学评价酸雨对全生育期植物环境安全性提供基础实验数据与参考。

1 材料方法

1.1 试材培养

挑选籽粒饱满水稻(*Oryza sativa*, 淮稻 8 号)种子, 用 0.1% HgCl_2 消毒 10 min, 去离子水冲洗去除表面残留 HgCl_2 , 去离子水浸泡后置于 25 °C 恒温光照培养箱中催芽 2 d, 将发芽种子移入苗床, 待幼苗长至两叶一心时移入周转箱(320 mm×215 mm×100 mm)中水培, 周转箱上置 15 穴的泡沫板, 每穴定植 2 株水稻幼苗, 营养液每隔 3 d 更换 1 次, 直至三叶一心。

营养液采用国际水稻研究所(IRRI)常规营养液配方并略作修改(Zhu 等, 2009)。Fe 以 Fe-EDTA 形式配入并保持营养液中 Fe 质量浓度为 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时加入 $\text{NaSiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 保持营养液中 SiO_2 质量浓度为 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$ 中加入 $5.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 双氰胺作为硝化抑制剂, 用 H_2SO_4 或 NaOH 将营养液 pH 调至 5.5。

1.2 模拟酸雨配置和实验处理

根据中国酸雨现状和趋势, 选择 3 个酸雨 pH 值 2.5、3.5、4.5, 并以 pH 5.5 为对照(CK)。根据东南地区天然降水离子水平(孔然等, 2012), 去离子水中分别添加一定量 CaCl_2 、 NaCl 、 K_2SO_4 、 NH_4NO_3 作为模拟天然降水, 其中 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 含量分别为 0.83、1.32、0.15、5.34、0.36、0.64、0.47、0.69 和 $1.80 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。用体积比为 1.1 : 1 的硫酸和硝酸配制 pH 1.0 酸雨母液(孔然等, 2012; 解淑艳等, 2012)。用酸雨母液调节模拟天然降水 pH 值至 2.5、3.5 和 4.5, 并经 FE-20 实验 pH 计校准(Yoshida 等, 1971), 作为喷施的酸雨溶液。并用酸雨母液调节营养液至 pH 4.5, 3.5, 2.5 作为培养酸性营养液。

培育至三叶一心后, 将水稻幼苗移入含酸性营养液的蛭石中持续酸雨胁迫处理, 同时对叶面喷淋与营养液 pH 值相同的模拟酸雨溶液, CK 喷施模拟天然降水, 每隔 3 d 喷 1 次酸雨, 根据东南地区降

雨量和蒸发量, 计算得每盆每次喷淋酸雨 300 mL, 每 3 d 补加 1 次营养液。

1.3 指标测定

各生育时期选取主茎上完全展开的第 1、2 片水稻叶子进行测定, 每个处理组重复测定 3 次。实验采用德国 Walz 公司生产的 PAM-210 脉冲调制式荧光仪进行水稻叶片活体荧光测定。实验测定前首先将叶片暗适应 20 min, 照射检测光($<0.05 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)后测得初始荧光 F_0 , 照射饱和脉冲光($12000 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)测得最大光化学量子产量 F_v/F_m , 打开内源光化光($180 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)后, 一次照射检测光合饱和脉冲光(1 个脉冲), 每隔一定时间测定光适应下荧光参数及荧光猝灭曲线, 待实际原初光能捕获效率 ΦPSII (作用光存在时 PSII 的原初光能捕获效率)稳定后, 关闭作用光, 立即照射远红外光, 光化学猝灭参数 qP 、非光化学猝灭参数 qN 、PSII 的电子传递速率 ETR 也由仪器自动计算给出。

1.4 数据处理

各处理组与对照组设置 3 次重复, 所有数据为 3 次独立试验平均值±标准误差(Mean±SD), 运用 SPSS 16.0 软件, 通过 LSD 检验($P < 0.05$)分析处理间的差异显著性。

2 结果

2.1 酸雨对幼苗期荧光参数的影响

表 1 显示了酸雨对幼苗期水稻叶绿素荧光参数的影响。与 CK 相比, pH 4.5 酸雨使 F_v/F_m , ETR, ΦPSII , qP 显著降低, qN 、 F_0 显著升高; pH 3.5 酸雨使 F_v/F_m 、ETR、 ΦPSII 、 qP 、 qN 显著降低, F_0 显著升高; pH 2.5 酸雨使 F_v/F_m 、ETR、 ΦPSII 、 qP 、 qN 显著降低, F_0 显著升高。

2.2 酸雨对分蘖期荧光参数的影响

表 2 显示了酸雨对分蘖期水稻叶绿素荧光参数的影响。与 CK 相比, pH 4.5 酸雨使 qP 显著降低, F_v/F_m 、ETR、 ΦPSII 、 F_0 变化不显著, qN 显著升高; pH 3.5 酸雨使 F_v/F_m 、ETR、 ΦPSII 、 qP 显著降低, qN 变化不显著, F_0 显著升高; pH 2.5 酸雨使 F_v/F_m 、ETR、 ΦPSII 、 qP 、 qN 显著降低, F_0 显著升高。

2.3 酸雨对孕穗期荧光参数的影响

表 3 显示了酸雨对孕穗期水稻叶绿素荧光参数的影响。与 CK 相比, pH 4.5 酸雨使 F_v/F_m 、ETR、 ΦPSII 、 qP 显著降低, F_0 、 qN 显著升高; pH 3.5 酸雨使 F_v/F_m 、ETR、 ΦPSII 、 qP 、 qN 显著降低, F_0 显著升高; pH 2.5 酸雨使 F_v/F_m , ETR, ΦPSII , qP , qN 显著降低, F_0 显著升高。

表 1 酸雨对幼苗期水稻叶绿素荧光参数的影响
Table 1 Effects of acid rain on chlorophyll fluorescence parameters in rice at seedling stages

酸雨 pH	幼苗期荧光参数					
	Fo	Fv/Fm	ETR	ΦPSII	qP	qN
CK	0.208±0.003d (100.00)	0.808±0.003a (100.00)	16.7±0.7a (100.00)	0.330±0.015a (100.00)	0.484±0.010a (100.00)	0.413±0.008b (100.00)
4.5	0.224±0.006c (107.69)	0.781±0.006b (96.99)	15.3±0.6b (91.60)	0.302±0.012b (91.61)	0.465±0.010b (96.21)	0.448±0.004a (108.64)
3.5	0.248±0.016b (119.07)	0.740±0.008c (91.54)	13.9±0.2c (83.60)	0.276±0.003c (83.61)	0.423±0.004c (87.46)	0.394±0.010c (95.48)
2.5	0.276±0.011a (132.85)	0.673±0.007d (83.33)	12.5±0.6d (74.80)	0.247±0.012d (74.82)	0.400±0.008d (82.56)	0.357±0.013d (86.43)

表中数据为平均值±标准差(n=3); 同列中无相同字母分别表示在P<0.05水平上差异显著; 括号为相对值

表 2 酸雨对分蘖期水稻叶绿素荧光参数的影响
Table 2 Effects of acid rain on chlorophyll fluorescence parameters in rice at tillering stages

酸雨 pH	分蘖期荧光参数					
	Fo	Fv/Fm	ETR	ΦPSII	qP	qN
CK	0.199±0.005c (100.00)	0.803±0.005a (100.00)	21.4±0.9a (100.00)	0.425±0.018a (100.00)	0.531±0.005a (100.00)	0.432±0.006b (100.00)
4.5	0.209±0.008c (105.19)	0.788±0.004a (98.09)	20.4±0.2a (95.02)	0.404±0.005a (94.98)	0.516±0.006b (97.24)	0.453±0.010a (104.86)
3.5	0.227±0.011b (114.24)	0.743±0.005c (92.53)	18.2±0.8b (85.07)	0.361±0.015b (84.94)	0.476±0.010c (89.76)	0.426±0.011b (98.54)
2.5	0.256±0.005a (128.64)	0.691±0.002d (86.05)	16.6±0.7c (77.54)	0.328±0.014c (77.25)	0.464±0.008c (87.44)	0.389±0.006c (89.98)

表中数据为平均值±标准差(n=3); 同列中无相同字母分别表示在 P<0.05 水平上差异显著; 括号为相对值

表 3 酸雨对孕穗期水稻叶绿素荧光参数的影响
Table 3 Effects of acid rain on chlorophyll fluorescence parameters in rice at booting stage

酸雨 pH	孕穗期荧光参数					
	Fo	Fv/Fm	ETR	ΦPSII	qP	qN
CK	0.211±0.004d (100.00)	0.811±0.003a (100.00)	19.4±0.4a (100.00)	0.385±0.008a (100.00)	0.549±0.012a (100.00)	0.443±0.011b (100.00)
4.5	0.229±0.011c (108.84)	0.755±0.006b (93.12)	17.41±0.1b (89.76)	0.338±0.001b (87.77)	0.480±0.008b (87.45)	0.470±0.018a (106.09)
3.5	0.264±0.005b (125.08)	0.723±0.003b (89.11)	15.8±0.4b (81.58)	0.314±0.007c (81.65)	0.463±0.007b (84.34)	0.406±0.012c (91.58)
2.5	0.297±0.009a (140.69)	0.616±0.010c (75.96)	13.5±0.9c (69.88)	0.269±0.018d (69.99)	0.422±0.007c (76.87)	0.349±0.008d (78.80)

表中数据为平均值±标准差(n=3); 同列中无相同字母分别表示在 P<0.05 水平上差异显著; 括号为相对值

表 4 酸雨对灌浆期水稻叶绿素荧光参数的影响
Table 4 Effects of acid rain on chlorophyll fluorescence parameters in rice at filling stage

酸雨 pH	灌浆期荧光参数					
	Fo	Fv/Fm	ETR	ΦPSII	qP	qN
CK	0.219±0.006c (100.00)	0.793±0.004a (100.00)	18.9±0.8a (100.00)	0.359±0.017a (100.00)	0.575±0.013a (100.00)	0.435±0.012ab (100.00)
4.5	0.222±0.010c (101.52)	0.804±0.008a (101.39)	17.9±0.7a (99.08)	0.356±0.014a (99.08)	0.564±0.007a (98.03)	0.455±0.007a (104.52)
3.5	0.252±0.003b (115.07)	0.760±0.011b (95.76)	15.5±0.5b (85.82)	0.308±0.011b (85.77)	0.517±0.005b (89.86)	0.429±0.005b (98.54)
2.5	0.299±0.002a (136.68)	0.627±0.008c (78.99)	13.1±0.4c (72.38)	0.259±0.008c (72.28)	0.458±0.007c (79.61)	0.355±0.007c (81.61)

表中数据为平均值±标准差(n=3); 同列中无相同字母分别表示在 P<0.05 水平上差异显著; 括号为相对值

2.4 酸雨对灌浆期荧光参数的影响

表4显示了酸雨对灌浆期水稻叶绿素荧光参数的影响。与CK相比,pH 4.5酸雨处理下,F_o、F_v/F_m、ETR、ΦPSII、qP、qN变化均不显著显著;pH 3.5酸雨使F_v/F_m、ETR、ΦPSII、qP显著降低,qN变化不显著显著,F_o显著升高;pH 2.5酸雨使F_v/F_m、ETR、ΦPSII、qP、qN显著降低,F_o显著升高。

3 讨论

叶绿素荧光反应可通过无损伤原位叶片测定方法快速测定逆境污染胁迫下植物叶片叶绿素荧光参数,用以评价光合机构功能和环境胁迫对植物的影响,探明光合机构受影响的部位(Speranza等,2011;李晓等,2006;苏行等,2002),广泛应用于逆境胁迫对植物光合作用影响的研究(洪涛等,2005)。初始荧光F_o是PSII反应中心全部开放时的荧光,其升高源于PSII反应中心可逆或不可逆失活(李霞等,2002);F_v/F_m是最大光化学量子产量,反映PSII反应中心原初光能转换效率,正常条件下该参数不受物种和生长条件影响,逆境时明显下降(郭春芳和孙云,2006);ΦPSII是环境胁迫下,PSII反应中心部分关闭时的实际原初光能捕获效率,亦为PSII反应中心光化学反应实际效率;ETR反映实际光强下的表观电子传递效率。qP和qN均增加有利于逆境中对光合系统起到保护作用,qP降低表明光能转化效率和通过PSII的能流减少,必然会使光合电子传递能力减弱,叶片暗反应受阻;qN降低表明PSII的保护机制受到损伤,而过剩激发能会进一步对PSII中心造成伤害(Sharma等,1998)。

水稻幼苗期,pH 4.5酸雨胁迫下F_o和qN升高,F_v/F_m、ΦPSII、ETR、qP下降,表明pH 4.5酸雨导致水稻幼苗PSII反应中心损坏,光合电子传递受阻,光合作用受抑制,通过增加热耗散来消除因光化学效率降低所累积的过量光能(李晓等,2006),与前人提出的“PSII反应中心受损会减弱电子传递和增加热耗散来耗散过量光能而保护PSI”(Arbinson等,1990)的观点一致,推测原因可能是较高浓度H⁺影响了水稻叶绿体功能,进而对PSII造成影响。当酸雨pH降至3.5或2.5时,水稻幼苗F_o升高,F_v/F_m、ΦPSII、ETR、qP和qN下降,PSII活性中心和保护机制受损,且随酸雨pH值降低损害加重,表明酸雨(pH 3.5和pH 2.5)导致过量活性氧累积,细胞抗氧化能力降低(Livingstone等,2001),光合色素及类囊体膜受损(Hattab等,2009),光能利用效率降低,QA重新氧化为质体醌QA的量减少,电子传递能力下降,而过剩激发能也会进一步对PSII中心造成伤害,最终降低了光合作用(Qiu等,2013)。这可能是处于幼苗期的水稻根

少叶小,光合产物较少,叶绿体中PSII易受酸雨污染影响,当受到较高强度酸雨胁迫时,光合系统易受到伤害,表现为水稻叶绿素荧光反应对酸雨胁迫较为敏感。

水稻分蘖期,pH 4.5酸雨持续胁迫下F_o、F_v/F_m、ΦPSII、ETR无显著差异,qP下降,qN升高,表明pH 4.5酸雨胁迫下,PSII捕获的光能不能充分地转化为植物所需要的化学能将其用于光化学反应,多余的光能以热的形式耗散掉,启动了能量耗散机制来保护光合机构以免于受到酸雨胁迫的伤害(Horton等,1991;Demmig-Adams等,1990;Demmig-Adams和Adams等,1992),且下降幅度小于幼苗期,这可能由于分蘖期水稻生长代谢旺盛,抗逆能力随着酸雨持续胁迫并未小于幼苗期所致。当酸雨pH值降至3.5或2.5时,水稻分蘖期F_o升高,F_v/F_m、ΦPSII、ETR、qP、qN下降,表明水稻的PSII原初光能转化率降低,光合电子传递受阻,热耗散机制未启动,导致光合作用受抑制,且下降幅度小于幼苗期,表明高强度酸雨下分蘖期水稻抗逆性大于幼苗期,这可能由于水稻分蘖期属于旺盛生长的营养生长期,不断出叶和分蘖,发根能力强,根群生命力强,故抗逆性较幼苗期强,PSII受酸雨影响没有幼苗期敏感。

水稻孕穗期,在pH 4.5、3.5和2.5酸雨持续胁迫下F_o均升高,F_v/F_m、ΦPSII、ETR、qP均下降,而qN在pH 4.5酸雨胁迫时升高,在pH 3.5和2.5酸雨胁迫时下降,随pH值降低降幅增大,表明随酸雨pH值的降低,孕穗期水稻PSII受损越来越严重;且同pH值酸雨胁迫时,孕穗期各指标幅度变化均大于幼苗期和分蘖期,表明孕穗期对酸雨胁迫最敏感,这可能由于孕穗期水稻叶层发生功能分工,酸雨导致的下层叶片早枯影响了根部对矿质元素和N素的吸收,进而影响了水稻的抗逆性和适应性,表现为叶片PSII对酸雨污染敏感。

水稻灌浆期,pH 4.5酸雨持续胁迫下各指标均无显著差异,pH 3.5酸雨持续胁迫下F_o升高,F_v/F_m、ΦPSII、ETR、qP下降,qN无显著差异,且出现灌浆期上述各指标变化幅度小于幼苗期、分蘖期和孕穗期,即pH 4.5或3.5酸雨持续胁迫下水稻受到伤害大小规律为灌浆期<幼苗期<分蘖期<孕穗期。这有可能是灌浆期水稻已完成营养生长,进入生殖生长后期,生长发育趋于稳定,对酸雨胁迫耐受性强;还可能由于长时间的酸雨胁迫使水稻对酸雨的抗逆性增强所致。而pH 2.5酸雨持续胁迫下灌浆期水稻F_o升高,F_v/F_m、ΦPSII、ETR、qP、qN下降,与其他三生育期相比,水稻受到伤害大小规律为分蘖期<幼苗期<灌浆期<孕穗期,这可能

由于 pH 2.5 酸雨使水稻叶片 PSII 严重受损, 酸雨持续胁迫至灌浆期造成更严重的伤害, 从而表现为灌浆期水稻受伤害最严重。

酸雨胁迫下, pH 4.5 酸雨显著影响了幼苗期, 孕穗期叶绿素荧光参数, 对分蘖期和灌浆期叶绿素荧光参数无显著影响。pH 3.5 酸雨却不同程度造成各生育时期水稻荧光参数的显著变化, 故此 pH 值下它们的变化程度可以用来辨别各生育期间抗性差异, 实验结果表明孕穗期水稻最敏感。

4 结论

酸雨污染胁迫下, 酸雨酸度与水稻叶片叶绿素荧光反应存在剂量-效应关系; 对比不同生育期水稻荧光参数变幅可知, 酸雨对孕穗期水稻荧光参数影响最大, 孕穗期水稻最敏感, 表明不同生育时期水稻光合作用对酸雨胁迫抗性存在差异。同时持续酸雨胁迫下, 酸雨对不同生育时期水稻光合作用的影响也会发生改变, 特别是高强度酸雨胁迫(pH 2.5 酸雨), 这些是评价酸雨对植物胁迫时需考虑因素。

参考文献:

- ARBINSON J, GENTY B, BAKER N R. 1990. The relationship between CO_2 assimilation and electron transport in leaves[J]. *Photosynthesis Research*, 25(3): 213-224.
- DEMMIG-ADAMS B. 1990. Carotenoids and photoprotection in plants: a role for the xanthophyll zeaxanthin[J]. *Biochimica Biophysica Acta*, 1020(1): 1-24.
- DEMMIG-ADAMS B, ADAMS I. 1992. Photoprotection and other responses of plants to high light stress[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 43(1): 599-626.
- HATTAB S, DRIDI B, CHOUBA L, et al. 2009. Photosynthesis and growth responses of pea *Pisum sativum* L. under heavy metals stress[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 21(11): 1552-1556.
- HORTON P, RUBAN A V, REES D, et al. 1991. Control of the light-harvesting function of chloroplast membranes by aggregation of the LHCII chlorophyll—protein complex[J]. *FEBS Letters*, 292(1): 1-4.
- HU X, HU C, SUN X, et al. 2009. Effects of simulated acid rain on soil acidification, availabilities and temporal and spatial variations of Cu and Pb in a vegetable field under natural conditions[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 7(1): 92-96.
- KOOTEN O, SNEL J F. 1990. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology[J]. *Photosynthesis Research*, 25(3): 147-150.
- KORICHEVA J, ROY S, Vranjic J A, et al. 1997. Antioxidant responses to simulated acid rain and heavy metal deposition in birch seedlings[J]. *Environmental Pollution*, 95(2): 249-258.
- KUMMEROVA M, KRULOVA J, ZEZULKA Š, et al. 2006. Evaluation of fluoranthene phytotoxicity in pea plants by Hill reaction and chlorophyll fluorescence[J]. *Chemosphere*, 65(3): 489-496.
- LARSEN T, LYDERSEN E, TANG D, et al. 2006. Acid rain in China[J]. *Environmental Science and Technology*, 40(2): 418-425.
- LIU D, WANG X, ZHANG X. 2013. Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings[J]. *Plant Soil and Environment*, 59(5): 196-200.
- LIVINGSTONE D. 2001. Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 42(8): 656-666.
- MASSACCI A, PIETRINI F, LORETO F. 1995. The effect of growth at low temperature on photosynthetic characteristics and mechanisms of photoprotection of maize leaves[J]. *Journal of Experimental Botany*, 46(1): 119-127.
- MENZ F C, SEIP H M. 2004. Acid rain in Europe and the United States: an update[J]. *Environmental Science and Policy*, 7(4): 253-265.
- NAKAMURA K, AKIYAMA H, KAWANO N, et al. 2013. Evaluation of real-time PCR detection methods for detecting rice-products contaminated by rice genetically modified with a CpTI-KDEL-T-nos transgenic construct[J]. *Food Chemistry*, 141(3): 2618-2624.
- NIU Y, GAO B, SLAVIN M, et al. 2013. Phytochemical compositions, and antioxidant and anti-inflammatory properties of twenty-two red rice samples grown in Zhejiang[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 54(2): 521-527.
- QIU Z Y, WANG L H, ZHOU Q. 2013. Effects of bisphenol A on growth photosynthesis and chlorophyll fluorescence in above-ground organs of soybean seedlings [J]. *Chemosphere*, 90(3): 1274-1280.
- SHARMA P K, ANAM P, SANKHALKAR S, et al. 1998. Photochemical and biochemical changes in wheat seedlings exposed to supplementary ultraviolet-B radiation[J]. *Plant Science*, 132(1): 21-30.
- SPERANZA A, CROSTI P, MALERBA M, et al. 2011. The environmental endocrine disruptor, bisphenol A, affects germination, elicits stress response and alters steroid hormone production in kiwifruit pollen[J]. *Plant Biology*, 13(1): 209-217.
- SUN Z, WANG L, CHEN M, et al. 2012. Interactive effects of cadmium and acid rain on photosynthetic light reaction in soybean seedlings[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 79(1): 62-68.
- VELIKOVA V, TSONEV T, YORDANOV I. 1999. Light and CO_2 responses of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in bean plants after simulated acid rain[J]. *Physiologia Plantarum*, 107(1): 77-83.
- WOOD T, BORMANN F. 1974. The effects of an artificial acid mist upon the growth of *Betula alleghaniensis* Britt.[J]. *Environmental Pollution*, 7(4): 259-268.
- WYRWICKA A, SKLODOWSKA M. 2006. Influence of repeated acid rain treatment on antioxidative enzyme activities and on lipid peroxidation in cucumber leaves[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 56(2): 198-204.
- YANG Y, ZHONG J, OUYANG Y D, et al. 2013. The integrative expression and co-expression analysis of the *AGO* gene family in rice[J]. *Gene*, 528(2): 221-235.
- YOSIHDA S, FORNO D A, COCK J, et al. 1976. Laboratory manual for physiological studies of rice[M]. Third Edition. The International Rice Research Institute: 61-65.
- YU J, YE S, HUANG L. 2002. Effects of simulated acid precipitation on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzymes in *Cucumis sativus* L.[J]. *Photosynthetica*, 40(3): 331-335.
- ZHU Y, DI T, XU G, et al. 2009. Adaptation of plasma membrane H^+ -ATPase of rice roots to low pH as related to ammonium nutrition[J]. *Plant, Cell and Environment*, 32(10): 1428-1440.
- 郭春芳, 孙云. 2006. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理研究中的应用[J]. *福建教育学院学报*, 7(7): 119-123.
- 洪涛, 刘世琦, 精高斌. 2005. 光质对彩色甜椒幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. *西北农业学报*, 14(1): 41-45.
- 中华人民共和国环境保护部. 2010. 2010年中国环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部: 27-33.

- 解淑艳, 王瑞斌, 郑皓皓. 2012. 2005—2011 年全国酸雨状况分析[J]. 环境监控与预警, 4(5): 33-37.
- 孔然, 郑祥民, 黄文丹, 等. 2012. 上海市区与郊区降水的离子组成特征及来源[J]. 城市环境与城市生态, 25(5): 22-27.
- 李霞, 焦德茂, 刘友良, 等. 2002. 自然条件下不同高产稻生育后期剑叶叶绿素荧光和膜脂过氧化的表现[J]. 植物学报, 44(4): 413-421.
- 李晓, 冯伟, 曾晓春. 2006. 叶绿素荧光分析技术及应用进展[J]. 西北植物学报, 26(10): 2186-2196.
- 苏行, 胡迪琴, 林植芳, 等. 2002. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物生态学报, 26(5): 599-604.
- 童贯和. 2005. 模拟酸雨致酸土壤对小麦幼苗生长发育的影响[J]. 农村生态环境, 21(1): 47-50.
- 王润年, 姚桃峰, 王鹤龄, 等. 2011. 孕穗期模拟酸雨对春小麦叶片光合气体交换特性及产量的影响[J]. 草业学报, 20(1): 237-241.
- 姚桃峰, 王润年, 王鹤龄, 等. 2010. 拔节期模拟酸雨对春小麦叶片光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 38(15): 8069-8073.
- 姚桃峰, 王润元, 王鹤龄, 等. 2010. 半干旱雨养农业区灌浆期模拟酸雨对春小麦叶片光合特性及产量的影响[J]. 地球科学进展, 25(6): 638-646.

Effects of acid rain on the chlorophyll fluorescence reaction in rice at the whole growth stages

WANG Wen, LI Man, WANG Lihong, ZHOU Qing*

School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: Acid rain is one of the global environmental issues. China has become the third largest acid rain region behind Western Europe and North America. Photosynthesis is the physiological basis of biomass and yield formation of plants, and chlorophyll fluorescence is commonly used for evaluating the damage of stress to photosynthesis of plants. Previous studies showed that acid rain influences the chlorophyll fluorescence of plants. However, the stress resistance of plants varies with the growth stage of plants. In the present work, the effects of acid rain on chlorophyll fluorescence of rice (*Oryza sativa*) at the whole growth stages (from seedling stage, tillering stage, booting stage and filling stage) were investigated, and none relevant reports have been published so far. Rice (from seedling stage to filling stage) were continuously treated with simulated acid rain (pH value of acid rain were 4.5, 3.5, 2.5) or control rain (sprayed every three days). The control leaves and acid rain-treated leaves of rice were sampled at seedling stage, tillering stage, booting stage and filling stage, respectively, to measure the chlorophyll fluorescence parameters with an in situ nondestructive testing technology (pulse modulation Chlorophyll Fluorometer PAM-210, Heinz Walz GmbH, Germany). The results showed that when rice was treated with acid rain at pH 4.5, initial fluorescence (F_o) at seedling stage and booting stage were significantly increased 7.69% and 8.84%, non-photochemical quenching coefficient (q_N) at seedling stage, tillering stage and booting stage were significantly increased 8.64%, 4.86% and 6.09%, maximal chlorophyll fluorescence (F_v/F_m), electron transport rate of PSII (ETR), effective quantum yield of photochemical energy conversion of PSII (Φ_{PSII}), photochemical quenching coefficient (q_P) at seedling stage and booting stage were significantly decreased, the decreased degrees were 3.01% and 6.88% (F_v/F_m), 8.40% and 10.24% (ETR), 8.39% and 12.23% (Φ_{PSII}), 3.79% and 12.55% (q_P), respectively. Acid rain at pH 3.5 and pH 2.5 significantly decreased the F_v/F_m , ETR, Φ_{PSII} , q_P and q_N in rice at whole stages except increases in the q_N at booting stage/filling stage and F_o at all stages of rice, moreover, the change degrees were increased as the pH value of acid rain was decreased. In addition, when rice was continuously treated with acid rain at pH 4.5 or pH 3.5, the extents of damage to rice at different growth stages showed the following order: filling stage < seedling stage < tillering stage < booting stage, however, when rice was continuously treated with acid rain at pH 2.5, the extents of damage to rice at different growth stages showed the following order: tillering stage < seedling stage < filling stage < booting stage. In conclusion, acid rain performed a dose-effect relationship on chlorophyll fluorescence parameters in rice. The continued stress of acid rain had obvious effects on photosynthesis in rice at whole stages, but the sensitivity of photosynthesis in rice to the stress of acid rain varied with the growth stage of rice. These differences should be considered in evaluating the effects of acid rain on plants.

Key words: acid rain; rice; whole growth stages; sustained; chlorophyll fluorescence